

ХОМЕНКО О.І., канд. техн. наук, с.н.с., ІПМ НАНУ, Київ
БАГЛЮК Г.А., докт. техн. наук, зав. відділом, ІПМ НАНУ, Київ
ХОМЕНКО А.О., магістрантка кафедри КХТП, НТУУ «КПІ», Київ

ВПЛИВ СХЕМИ ПРЕСУВАННЯ НА РОЗПОДІЛ ГУСТИНИ ПОРОШКОВОЇ ЗАГОТОВКИ ПРИ УЩІЛЬНЕННІ В ЗАКРИТІЙ МАТРИЦІ

Выполнено математическое моделирование уплотнения цилиндрической порошковой заготовки в закрытой жесткой матрице с использованием сочетания прямого вариационного и визиопластического методов. Исследовано изменение плотности по толще заготовки при различных схемах нагружения. Проведена экспериментальная проверка полученных результатов.

Виконано математичне моделювання ущільнення циліндричної порошкової заготовки у закритій жорсткій матриці з використанням поєднання прямого варіаційного та визиопластичного методів. Досліджено зміни густини по товщі заготовки при різних схемах навантаження. Здійснено експериментальну перевірку отриманих результатів.

The computational modelling of the porous cylindrical billet in the rigid closed die using combination of direct variation and visioplastic methods was realized. Density variations through material bulk under different loading patterns was investigated. The obtained results were verified experimentally.

Задача ущільнення циліндричної порошкової заготовки у жорсткій закритій матриці є в декотрій мірі класичною, та попри чисельні варіанти її вирішення вона досі цікава і теоретично, як підґрунтя для дослідження ущільнення заготовок більш складних геометричних форм, і практично, для розробки технологічних процесів у порошковій металургії. Одним з перспективних методів вирішення вказаної задачі є прямий варіаційний метод. Зазвичай у роботах, що присвячені цьому методу, розглядають обмежену кількість схем ущільнення, зокрема у [1] – однобічне та двобічне симетричне пресування. Але на реальному обладнанні співвідношення швидкостей пуансонів може бути будь-яким, тому певну цікавість має створення математичної моделі ущільнення, що ураховує саме цей факт.

При використанні прямого варіаційного метода заготовку умовно розділяють на окремі частини та розглядають деформацію цих частин. При цьому експериментальна перевірка вірності результатів, отриманих при моделюванні, достатньо проблематична. Але, якщо визначати поле швидкостей у вузлах умовної сітки, цю проблему можна вирішити застосуванням визиопластичного метода.

Розглянемо двобічне ущільнення порошкової заготовки у жорсткій закритій матриці з внутрішнім радіусом R . Хай верхній пуансон рухається з постійною

швидкістю v_0 , а нижній – у протилежному напрямку з рівною, або меншою швидкістю (рис. 1).

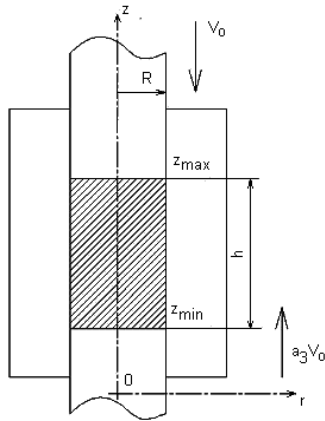


Рис. 1. Загальна схема двобічного пресування

Граничні умови можна записати у вигляді

$$\begin{aligned} v_r(R, z) &= 0; \\ v_r(r, 0) &= 0; \\ v_r(0, z) &= 0; \\ v_z(r, z_{\max}) &= -v_0; \\ v_z(r, z_{\min}) &= a_3 v_0, \\ \text{де } 0 &\leq a_3 \leq 1. \end{aligned}$$

Очевидно, що існує таке значення координати $z_{\min} < z_{\text{mid}} < z_{\max}$, при якому швидкість v_z обертається в 0. Хай

$$\begin{aligned} v_z|_{z < z_{\text{mid}}} &= -v_0 \frac{(1+a_3)z - a_3 z_{\max} - z_{\min}}{z_{\max} - z_{\min}} \left(1 - a_1 \left(1 + a_2 \frac{r^2}{R^2} \left(\frac{(1+a_3)(z - z_{\min})}{a_3(z_{\max} - z_{\min})} \right) \right) \right) \\ v_z|_{z \geq z_{\text{mid}}} &= -v_0 \frac{(1+a_3)z - a_3 z_{\max} - z_{\min}}{z_{\max} - z_{\min}} \left(1 - a_1 \left(1 + a_2 \frac{r^2}{R^2} \left(\frac{(1+a_3)(z_{\max} - z)}{z_{\max} - z_{\min}} \right) \right) \right) \end{aligned} \quad (1)$$

де a_1, a_2 - деякі параметри, $z_{\text{mid}} = (a_3 z_{\max} + z_{\min}) / (1 + a_3)$. Якщо $a_3 = 1$, має місце двобічне симетричне пресування і $z_{\text{mid}} = (z_{\max} + z_{\min}) / 2$. Якщо ж $a_3 = 0$, перше рівняння системи (1) втрачає сенс, а друге, з урахуванням того, що $z_{\min} = 0$, $z_{\max} - z_{\min} = h$, перетворюється у відоме співвідношення для однобічного пресування

$$v_z = -\frac{v_0 z}{h} \left(1 - a_1 \left(1 + a_2 \frac{r^2}{R^2} \right) \left(1 - \frac{z}{h} \right) \right),$$

яке відрізняється від наведеного у [1] тільки наявністю параметра a_2 , який враховує різнощільність при $r=0$.

Виходячи з граничних умов, визначимо компоненти тензора швидкостей деформації.

$$\left. \begin{aligned} e_r &= 0; \\ e_\varphi &= 0; \\ e_z|_{z < z_{\text{mid}}} &= -\frac{2v_0(1+a_3)}{z_{\max} - z_{\min}} \left(1 + a_1 \left(1 + a_2 \frac{r^2}{R^2} \right) \frac{2(1+a_3)z - ((2+a_3)z_{\min} + a_3 z_{\max})}{a_3(z_{\max} - z_{\min})} \right); \\ e_z|_{z \geq z_{\text{mid}}} &= -\frac{v_0(1+a_3)}{z_{\max} - z_{\min}} \left(1 - a_1 \left(1 + a_2 \frac{r^2}{R^2} \right) \frac{(1+2a_3)z_{\max} + z_{\min} - 2(1+a_3)z}{z_{\max} - z_{\min}} \right); \\ \gamma_{rz}|_{z < z_{\text{mid}}} &= \frac{2v_0 a_1 a_2 r}{R^2} \left(\frac{(1+a_3)z - a_3 z_{\max} - z_{\min}}{z_{\max} - z_{\min}} \right) \left(\frac{(1+a_3)(z - z_{\min})}{a_3(z_{\max} - z_{\min})} \right); \\ \gamma_{rz}|_{z \geq z_{\text{mid}}} &= \frac{\partial v_{2z}}{\partial r} = \frac{2v_0 a_1 a_2 r}{R^2} \left(\frac{(1+a_3)z - a_3 z_{\max} - z_{\min}}{z_{\max} - z_{\min}} \right) \left(\frac{(1+a_3)(z_{\max} - z)}{z_{\max} - z_{\min}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

При $a_3 = 0$, як і слід було чекати, вирази для $z < z_{mid}$ втрачають сенс, а вирази для $z \geq z_{mid}$ перетворюються у відомі співвідношення для однобічного пресування. Інтенсивність деформації

$$\left. \begin{aligned} H|_{z < z_{mid}} &= \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \sqrt{2e_z^2|_{z < z_{mid}} + 6\gamma_{rz}^2|_{z < z_{mid}}} ; \\ H|_{z \geq z_{mid}} &= \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \sqrt{2e_z^2|_{z \geq z_{mid}} + 6\gamma_{rz}^2|_{z \geq z_{mid}}} . \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Складова варіаційного функціоналу, що визначається внутрішніми силами опору деформації, матиме наступний вигляд:

$$J_1 = \sum_{i=1}^2 \iiint_V \sqrt{e_{zi}^2 f_1(\theta) + H_i^2 f_2(\theta)} dV, \quad (4)$$

де $e_{z1} = e_z^2|_{z < z_{mid}}$, $e_{z2} = e_z^2|_{z \geq z_{mid}}$, $H_1 = H|_{z < z_{mid}}$, $H_2 = H|_{z \geq z_{mid}}$,
 $f_1(\theta) = \frac{4}{9} \cdot \frac{(1-\theta)^4}{\theta}$, $f_2(\theta) = \frac{(1-\theta)^3}{3}$, θ – пористість. Складова варіаційного функціоналу, обумовлена тертям о бічні стінки матриці

$$J_2 = \sqrt{3} \sum_{i=1}^2 \iint_F \mu \sqrt{f_2(\theta) v_{zi}^2} dF, \quad (5)$$

де $v_{z1} = v_z|_{z < z_{mid}}$, $v_{z2} = v_z|_{z \geq z_{mid}}$. Швидкість ковзання на бічній поверхні циліндра ($r = R$)

$$\left. \begin{aligned} v_{z1}(R, z) &= -v_0 \frac{(1+a_3)z - a_3 z_{max} - z_{min}}{z_{max} - z_{min}} \left(1 - a_1(1+a_2) \frac{(1+a_3)(z - z_{min})}{a_3(z_{max} - z_{min})} \right), \\ v_{z2}(R, z) &= -v_0 \frac{(1+a_3)z - a_3 z_{max} - z_{min}}{z_{max} - z_{min}} \left(1 - a_1(1+a_2) \frac{(1+a_3)(z_{max} - z)}{z_{max} - z_{min}} \right). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

З урахуванням того, що елемент бічної поверхні $dF = R d\phi dz$, отримаємо

$$\begin{aligned} J_2 &= \frac{2\pi\sqrt{3}R\mu v_0}{z_{max} - z_{min}} \left[\int_{z_{min}}^{z_{mid}} \frac{(1-\theta)^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{3}} \frac{(1+a_3)z - a_3 z_{max} - z_{min}}{z_{max} - z_{min}} \left(1 - a_1(1+a_2) \frac{(1+a_3)(z - z_{min})}{a_3(z_{max} - z_{min})} \right) dz + \right. \\ &\quad \left. + \int_{z_{mid}}^{z_{max}} \frac{(1-\theta)^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{3}} \frac{(1+a_3)z - a_3 z_{max} - z_{min}}{z_{max} - z_{min}} \left(1 - a_1(1+a_2) \frac{(1+a_3)(z_{max} - z)}{z_{max} - z_{min}} \right) dz \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

Для розв'язання задачі потрібно знайти такі параметри a_1, a_2 , що при заданому a_3 мінімізують функціонал $J = J_1 + J_2$. При програмній реалізації розв'язання задачі постає питання про знаходження інтегралів у (4) і (7). Очевидна доцільність їх чисельного обчислювання, особливо, маючи на увазі подальше поширення запропонованої цифрової моделі на більш складні геометричні форми заготовок. Але при чисельному обчисленні одразу ж постає питання про похибку розрахунків, яка, у свою чергу, сильно залежить від класу функції, що інтегрується. У цьому сенсі досить перспективним уявляється метод

Монте-Карло, імовірна похибка якого достатньо легко розраховується. Проте коректне застосування цього метода потребує ретельного дослідження генератора послідовності псевдовипадкових чисел, що потрібний для його реалізації [2]. Тому результат моделювання, яке базується на вказаному методі, обов'язково треба обґрунтувати.

Для моделювання ущільнення циліндричної порошкової заготовки у жорсткій закритій матриці створено програму "ПРЕСС", що увійшла до складу апаратно-програмного комплексу "ТЕНЗОР" і сумісна по форматах вхідних даних з програмою "ДЕФОРМ" того ж комплексу, що реалізує розрахунки за візіопластичним методом [3]. Це дало змогу експериментально перевірити результати моделювання.

За допомогою програми "ПРЕСС" виконали моделювання ущільнення циліндричної порошкової заготовки з характеристиками, що наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Характеристики циліндричної порошкової заготовки

Початкова висота h_0 , мм	Кінцева висота h_t , мм	Діаметр d_0 , мм	Початкова відносна густина ρ , %	Коефіцієнт тертя μ
51	19,33	30	34,5	0,2

При значеннях коефіцієнту a_3 від 0 (однобічне пресування) до 1 (двобічне симетричне пресування) з кроком 0,25 моделювали ущільнення порошкової заготовки з вказаними у табл. 1 характеристиками. На переріз моделі заготовки по діаметральній площині уявно нанесли прямокутну сітку з кроком 5,1 мм по осі z , та з кроком 3 мм по осі r . З інтервалом 1 с розраховували переміщення вузлів цієї сітки та пористість, яку вважали постійною у межах комірки, створеної лініями сітки. Потрібне число інтервалів визначали за умовою досягнення заготовкою кінцевої висоти, після чого підраховували середню густину заготовки по усіх комірках сітки. У табл. 2 наведені значення середньої пористості, на рис. 2 показано роз поділ пористості по шарах заготовки, а на рис. 3 - лінії рівної пористості на тлі перерізів заготовок по діаметральній площині при різних співвідношеннях швидкостей пуансонів.

Таблиця 2. Середня пористість порошкової заготовки

a_3	0	0,25	0,5	0,75	1
$\theta_{\text{ср}}$, %	8,7	8,7	9	9	9,2

Для експериментальної перевірки отриманих результатів порошкову заготовку з характеристиками, що наведені у табл.1, ущільнили по схемі двобічного пресування і дослідили візіопластичним методом. Відносна густина заготовки після ущільнення склала 91%, відповідно пористість дорівнювала 9%, що погоджується з результатами моделювання. Криві рівної пористості, побудовані за результатами натурного експерименту, наведені на рис. 4. Як видно з рисунку, розрахункові криві наближаються до експериментальних. Деяку розбіжність можна пояснити як спрощеннями при моделюванні, так і похибками розрахунків при дослідженні натурної заготовки.

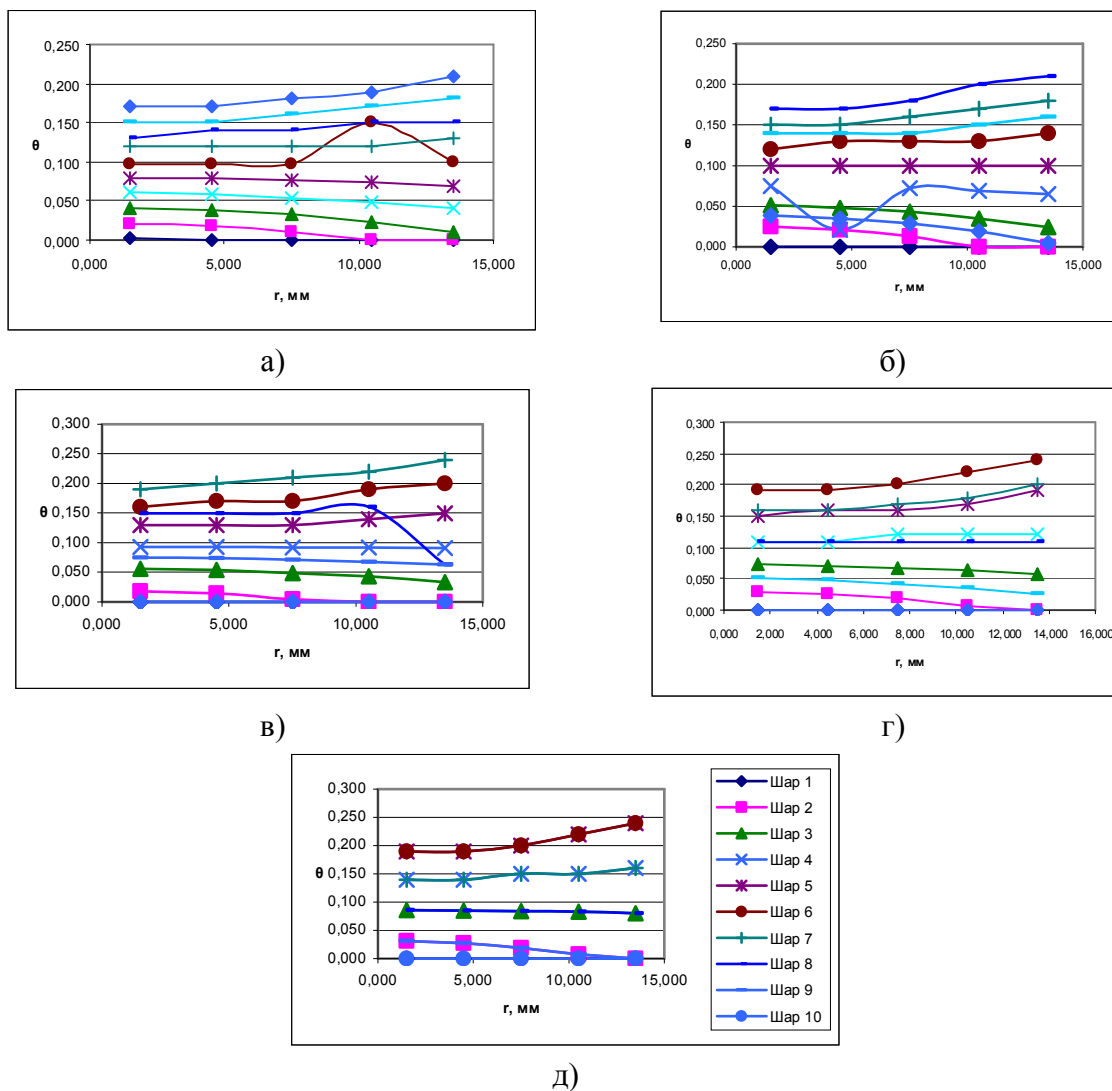


Рис.3. Розподіл пористості по шарах заготовки (а – модель, $a_3=0$; б - модель, $a_3=0,25$; в - модель, $a_3=0,5$; г - модель, $a_3=0,75$; д - модель, $a_3=1$)

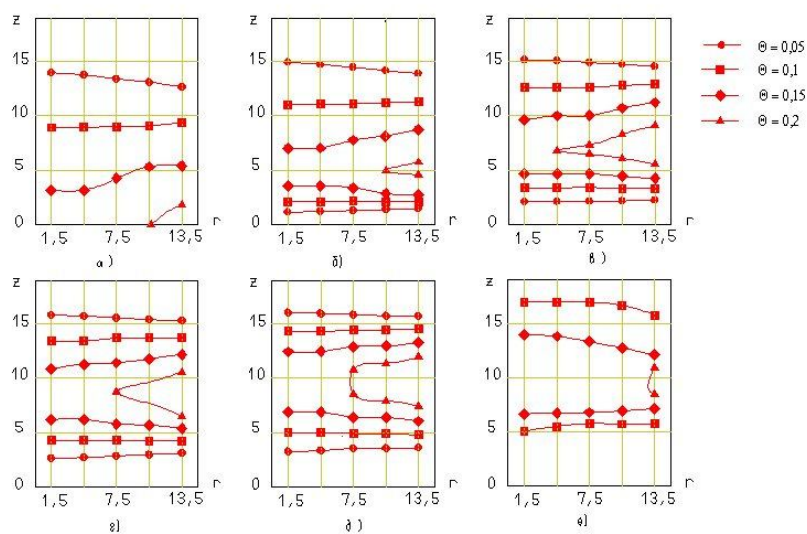


Рис. 4. Криві рівної пористості (а – модель, $a_3=0$; б - модель, $a_3=0,25$; в - модель, $a_3=0,5$; г - модель, $a_3=0,75$; д - модель, $a_3=1$; е – натурний експеримент)

Висновки: 1. Моделювання ущільнення циліндричної порошкової заготовки у жорсткому закритому штампі показало, що різні схеми пресування приводять до приблизно однакового значення середньої пористості але характеризуються суттєво різним розподілом пористості по товщі заготовки. 2. Експериментальне дослідження ущільнення циліндричної порошкової заготовки у жорсткому закритому штампі показало задовільну відповідність результатів комп'ютерного моделювання моделювання натурним.

Список літератури: 1. Баглюк Г.А. Сравнительный анализ схем нагружения при горячем доуплотнении пористой заготовки в закрытом штампе [Текст] / Г.А.Баглюк, М.Б.Штерн, В.Л.Юрчук. // Порошковая металлургия. – 1979. – №11 - С.19-22. 2. Бахвалов Н. С. Численные методы [Текст] / Н.С.Бахвалов, Н.П.Жидков, Г.М.Кобельков. – М.: Бином, 2006. – 622 с. 3. Баглюк Г. А. Апаратно-програмний комплекс для дослідження структурних змін деформованого матеріалу [Текст] / Г.А.Баглюк, О.І.Хоменко, Д.А.Гончарук // Наукові нотатки: Міжвузівський збірник (за напрямом "Інженерна механіка"). - 2009. - Вип. 25, ч. II - С. 9 - 11.

УДК 621.73.016

ГОЖИЙ С.П., докт. техн. наук, доц., НТУУ “КПІ”, Київ
КЛИСКО А.В., асп., НТУУ “КПІ”, Київ
НОСЕНКО А.И., маг., НТУУ “КПІ”, Київ

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ШТАМПОВКЕ ОБКАТЫВАНИЕМ С АКТИВНЫМИ СИЛАМИ ТРЕНИЯ

Показаны предпосылки создания и развития нового способа обработки давлением – штамповки обкатыванием с активными силами трения. Перспективность способа основана на возможности интенсификации формоизменения в заданных направлениях. Это позволяет изготавливать детали с различными конструктивными элементами. Рассмотрены конкретные технологические операции использования процесса.

Ключевые слова: штамповка обкатыванием, частота обкатывания, угол наклона оси обкатывания, обкатывающий инструмент.

Показані передумови створення і розвитку нового метода обробки тиском – штампування обкочуванням з активними силами тертя. Перспективність метода основана на можливості інтенсифікації формозміни в заданих напрямках. Це дозволяє виготовляти деталі з різними конструктивними елементами. Розглянуті конкретні технологічні операції застосування процесу.

Ключові слова: штампування обкочуванням, частота обкочування, кут нахилу осі обкочування, обкочувальний інструмент.

Preconditions of creation and development of new method of treatment pressure are rotated are stamping by a rolling-off with active forces of friction. Perspective of method is based on possibility of intensification of forming in the set directions. It allows making details with different structural elements. The concrete technological operations of the use of process are considered.

Keywords: stamping by a rolling-off, frequency of rolling-off, angle of slope of axis of rolling-off, instrument for rolling.